



THE UNIVERSITY *of* EDINBURGH

## Edinburgh Research Explorer

### **Realizzazione di un dispositivo per la generazione di “twisted flow” per prove su imbarcazioni a vela in galleria del vento**

**Citation for published version:**

Fossati, F, Zasso, A & Viola, IM 2006, 'Realizzazione di un dispositivo per la generazione di “twisted flow” per prove su imbarcazioni a vela in galleria del vento', Paper presented at IX Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento, Italy, 18/06/06 - 21/06/06.

**Link:**

[Link to publication record in Edinburgh Research Explorer](#)

**General rights**

Copyright for the publications made accessible via the Edinburgh Research Explorer is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

**Take down policy**

The University of Edinburgh has made every reasonable effort to ensure that Edinburgh Research Explorer content complies with UK legislation. If you believe that the public display of this file breaches copyright please contact [openaccess@ed.ac.uk](mailto:openaccess@ed.ac.uk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



# Realizzazione di un dispositivo per la generazione di “Twisted Flow” per prove su imbarcazioni a vela in Galleria del Vento

Fabio Fossati <sup>a</sup>, Alberto Zasso <sup>b</sup>, Ignazio Maria Viola <sup>b</sup>

<sup>a</sup>CIRIVE – Politecnico di Milano, Milano

<sup>b</sup>Dipartimento di Meccanica – Politecnico di Milano, Milano

PAROLE CHIAVE: Galleria del Vento, Twisted Vanes Device, Twist, Aerodinamica di Piani Velici, Sailing Yacht Aerodynamics.

## ABSTRACT

Questo lavoro presenta l'attività di ricerca volta alla progettazione e alla realizzazione di un particolare dispositivo da installare nella camera a sviluppo di stato limite della Galleria del Vento del Politecnico di Milano. Il dispositivo viene utilizzato per prove su imbarcazioni a vela e consente di deflettere la vena a monte del modello per generare un profilo verticale di velocità e di angolo, detto angolo di *twist*. Il lavoro presenta sia la particolare procedura di progetto che è stata appositamente implementata, sia il confronto tra le misure sperimentali e le analisi CFD che avevano consentito di predire correttamente il comportamento del dispositivo.

This paper presents the research activities carried out in developing a special wind tunnel device for the boundary layer test section of the Politecnico di Milano Wind Tunnel. The device is aimed at reproducing the variation in the onset wind speed and direction with height as seen by yachts as they sail in the boundary layer above the sea. The paper shows both the devoted design procedure and the experimental results measured and the CFD code computed results that well predicted the flow behaviour.

## 1 INTRODUZIONE

Il movimento di una imbarcazione nello strato limite atmosferico produce un *vento apparente* che risulta dalla somma vettoriale del vento atmosferico (detto *vento vero*) e dell'opposto del moto proprio dell'imbarcazione. Poiché il vento vero aumenta con la quota, la somma vettoriale del vento vero e del moto di trascinamento risulta aumentare in intensità e ruotare progressivamente verso poppa con la quota. In Figura 1 sono mostrati i triangoli di velocità per una imbarcazione che naviga di bolina. In Figura 2, si mostra la somma vettoriale a tre quote differenti e i tre angoli tra la direzione della barca e quella del vento apparente (indicato con tratto tratteggiato in figura). Questa rotazione del vento incidente è nota ai velisti come *twist* del vento. Le vele vengono regolate di conseguenza in modo tale da avere una geometria twistata lungo l'asse verticale analoga al profilo verticale dell'angolo di twist del vento apparente, in questo modo l'angolo di attacco tra una sezione orizzontale della vela e il vento incidente rimane simile alle diverse quote verticali.

Le prove in galleria del vento mirano generalmente alla misura delle forze sviluppate dal piano velico, o per poter confrontare piani velici differenti o per determinare i coefficienti aerodinamici delle vele che vengono utilizzati da programmi di predizione delle performance (Campbell & Cloughton, 1994; Fossati & Diana, 2002; Fossati et al., 2003). Poiché le forze sviluppate dal piano velico sono dovute al vento apparente e fortemente dipendenti dalla regolazione impartita, la corretta riproduzione del profilo verticale del twist del vento apparente è molto importante.

La riproduzione in galleria del vento di un profilo verticale di velocità è facilmente trattabile con le tecniche note nel campo dell'ingegneria del vento. Più complesso risulta riprodurre la variazione di angolo, in particolare se si vuole mantenere l'imbarcazione ferma durante la misura di forza poiché, in questo caso, non essendovi moto di trascinamento, il vento vero coincide con il vento apparente.

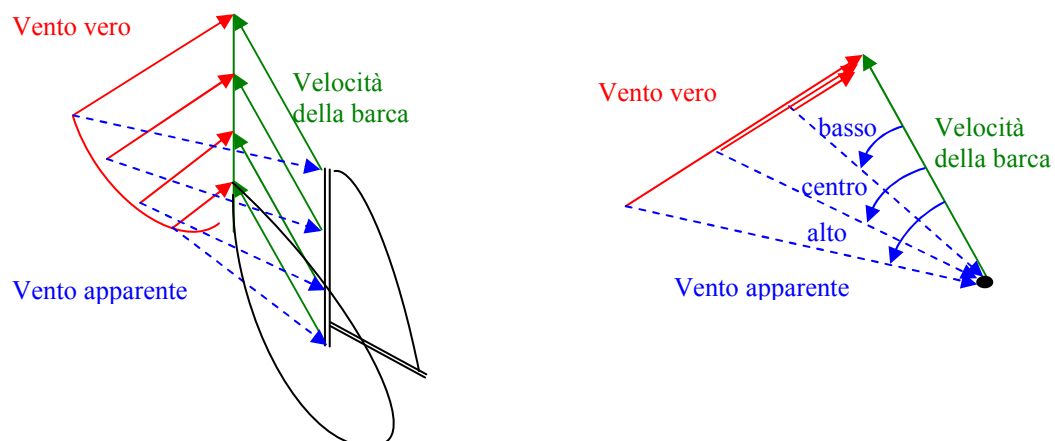


Figure 1 e 2. Triangoli di velocità per una imbarcazione che naviga mure a sinistra e dettaglio a tre quote verticali differenti.

In passato diversi gruppi di ricerca si sono confrontati con questo problema offrendo soluzioni differenti. Una soluzione adottata dai gruppi di ricerca sui veicoli terrestri dell'Università di Nottingham (Baker & Humphreys, 1992) e del Politecnico di Milano (Bocciolone *et al.*, 2003), consiste nel lanciare il veicolo lungo una rotaia in una galleria a sviluppo di strato limite. In tal modo è possibile ottenere il vento apparente come somma del vento vero con profilo verticale di velocità e del moto proprio del veicolo (Figura 3). Tuttavia questa soluzione rende necessario effettuare un lancio per ogni acquisizione di forza e, per poter avere delle misure statisticamente significative, bisogna effettuare diversi lanci. Inoltre, l'applicazione di questa tecnica alle imbarcazioni a vela renderebbe necessario l'utilizzo di vele rigide in contrasto con la necessità di modificarne la regolazione con facilità. Per questi motivi gli autori hanno preferito non adottare questo tipo di soluzione.

Un approccio differente è stato sviluppato dal gruppo di ricerca su imbarcazioni a vela dell'Università di Auckland. Il modello di imbarcazione viene lasciato fermo in una camera a strato limite che ha una delle pareti laterali porosa e dalla quale viene immesso un secondo flusso in modulo pari e direzione opposta alla velocità della barca (Flay *et al.*, 1996). Questa soluzione si è rivelata inefficiente ed è stata superata dagli stessi ideatori, i quali hanno proposto una soluzione alternativa che prevede l'utilizzo di deflettori per modificare la direzione di una unica vena incidente su modello fisso in modo differenziato con la quota. Anche in questo caso viene utilizzata una galleria a strato limite e, pochi metri a monte del modello, delle lastre sottili twistate lungo l'asse verticale deflettono la vena. La galleria realizzata ad Auckland dal prof. Flay (Flay & Vuletich (1995); Flay, 1996) ha una configurazione open jet, alta 3m e larga 6m, e tutta la sezione di uscita è occupata da una schiera di lastre sottili in materiale flessibile che vengono regolate da una serie di cavi bilanciati con dei contrappesi (Figura 4).

Durante l'attività di ricerca svolta dal Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano per il sindacato di Coppa America *Prada* nella campagna del 2003, è emersa la necessità di realizzare un dispositivo per la generazione di twist nella Galleria del Vento del Politecnico di Milano. La realizzazione del dispositivo è stata terminata nel luglio 2004 sviluppando l'idea percorsa dal gruppo di ricerca dell'Università di Auckland.

La progettazione del dispositivo ha richiesto che venissero raggiunti i seguenti obiettivi:

- il dispositivo deve essere installato nella camera a strato limite della galleria
- deve garantire una ampia area di flusso uniforme e con un angolo di twist controllato
- il flusso twistato deve risultare stabile e persistente nel tempo
- il dispositivo non deve incrementare significativamente il livello di turbolenza della vena
- deve essere facilmente regolato l'angolo di twist alle diverse quote
- il dispositivo deve poter essere facilmente installabile e rimovibile
- i costi di realizzazione e gestione non devono risultare eccessivi

Per raggiungere questi obiettivi è stata implementata una particolare procedura di progettazione che viene presentata in seguito.

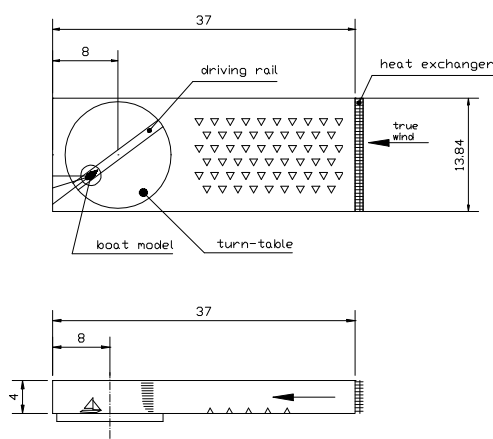


Figure 3 e 4. Sinistra: pianta e sezione della Galleria del Vento del Politecnico di Milano con il set up di prova per lanciare l'imbarcazione su una rotaia; destra: fotografia della Galleria del Vento di Auckland durante una sessione di prova.

### 1.1 La Galleria del Vento del Politecnico di Milano

Le Figure 5 e 6 mostrano una panoramica della Galleria del Vento del Politecnico di Milano. Questa è un circuito chiuso ad anello verticale ove sono presenti due camere di prova. La prima, di sezione 14x4m, occupa tutta la parte superiore dell'anello per uno sviluppo longitudinale di quasi 40m, il quale consente la generazione di strato limite. La seconda di sezione 4x4m consente di avere alte velocità e bassi livelli di turbolenza e si trova a valle di un convergente nella parte inferiore dell'anello. Le due differenti camere di prova e le differenti caratteristiche dei due flussi, consentono alla struttura di essere utilizzata per un'ampia gamma di applicazioni ingegneristiche. Le dimensioni particolarmente ampie della camera di prova a strato limite, consentono di provare modelli di grandi dimensioni che includono la riproduzione di ampie zone di territorio circostante. Le dimensioni dell'area trasversale ( $56\text{m}^2$ ) consente valori di bloccaggio molto bassi anche con modelli di dimensioni imponenti. I modelli vengono collocati su un tavolo girevole movimentato su film d'aria e controllato in remoto dalla camera di controllo, con un carico massimo di 100kN. Quando non vengono utilizzati generatori di turbolenza si misura un flusso molto regolare a meno di variazioni dell'ordine del  $\pm 3\%$  attraverso la sezione trasversale e indice di turbolenza inferiore al 2%. Diversamente, è possibile installare i convenzionali generatori di turbolenza (*spires*, *roughness elements*) di diverse dimensioni e geometrie per riprodurre flussi più o meno turbolenti e diversi profili di velocità. I profili possono anche essere generati con l'utilizzo differenziale dei 14 ventilatori assiali di dimensioni 2x2m ognuno, controllati individualmente, posti su 2 schiere orizzontali da 7 unità ciascuna. Infine è stato realizzato un generatore attivo di turbolenza per fluttuazioni a basse frequenze. Tra i motori e la camera di prova a generazione di strato limite vi è uno scambiatore di calore che consente di controllare la temperatura del flusso e di operare in continuo a temperatura costante.

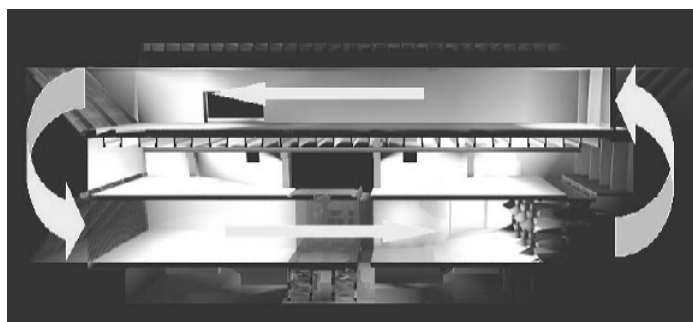
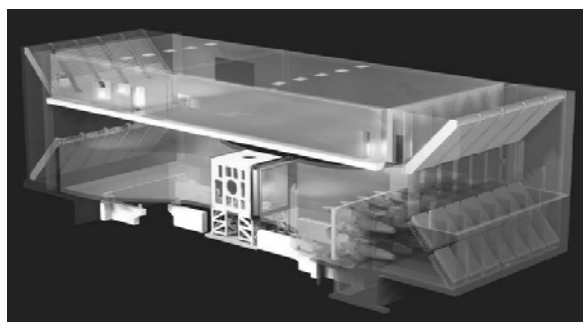


Figure 5 e 6. *Rendering* della Galleria del Vento del Politecnico di Milano: prospettiva e sezione longitudinale

Per quanto concerne le ricerche su imbarcazioni a vela, la camera di prova a generazione di strato limite consente l'utilizzo di modelli di grandi dimensioni con bassi valori di bloccaggio e velocità massime di 16m/s. Valori tipici delle scale dei modelli sono 1:10 per imbarcazioni di 40-50 piedi,

1:12 per MAXI yacht e International America's Cup Class (IACC). Inoltre lo sviluppo longitudinale della camera consente di provare contemporaneamente diversi modelli allo scopo di studiare l'interazione tra più imbarcazioni che navigano nello stesso specchio d'acqua.

La seconda camera di prova è caratterizzata da una particolare uniformità del flusso dell'ordine del  $\pm 0.2\%$  sulla sezione trasversale e livelli di turbolenza inferiori al  $0.15\%$ . La camera ha una sezione di  $4 \times 4\text{m}$  e si possono ottenere velocità superiori a  $200\text{ km/h}$ , pertanto è adatta alla realizzazione di flussi ad alti Reynolds. In particolare nel campo delle imbarcazioni, la camera di prova ad alte velocità è indicata per prove su appendici di carena che possono essere provate tipicamente in scala 1:2 per imbarcazioni IACC.

## 2 IL DISPOSITIVO PER LA GENERAZIONE DI TWISTED FLOW

Nelle Figure 7 e 8 sono presentati i triangoli di velocità in un piano orizzontale rispettivamente per un'imbarcazione che naviga di bolina (*upwind* in inglese, figura a sinistra) e al lasco (*downwind* in inglese, figura a destra). Il vento apparente  $V_a(z)$  risulta essere la somma vettoriale del vento vero  $V_t(z)$  che varia con la quota  $z$ , e della velocità della barca  $V_b$  presa con verso opposto. L'angolo al vento apparente  $\Psi(z)$ , che a sua volta varia con la quota  $z$ , è definito come l'angolo tra  $V_b$  e  $-V_a(z)$ . (Zasso *et al.*, 2004)

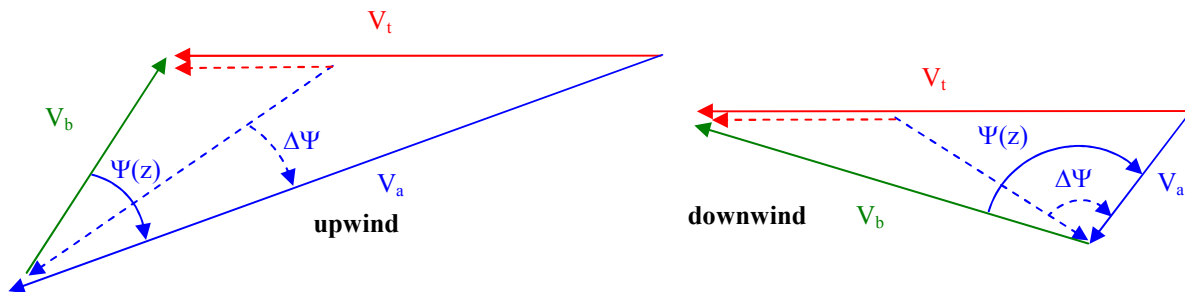


Figure 7 e 8. triangoli di velocità per una imbarcazione che naviga dritta rispettivamente in andatura upwind e downwind.  $\Psi(z)$

$\Psi(z)$  aumenta dal piano di galleggiamento ( $z = 0$ ) fino all'altezza della testa d'albero. In galleria del vento è necessario riprodurre correttamente la **variazione** dell'angolo al vento apparente  $\Delta\Psi$ , definita come la differenza tra  $\Psi(z_{\text{HEAD}})$  alla quota della testa dell'albero e  $\Psi(z_{\text{DECK}})$  alla quota della coperta della barca, rispettivamente indicate con linea continua e tratteggiata in entrambe le Figure 7 e 8.

I test in galleria del vento hanno come riferimento la quota nominale di  $z_{\text{ref}}=10\text{m}$  al vero alla quale si considera  $V_a(z_{\text{ref}})$  allineato con l'asse longitudinale della galleria. Di conseguenza si definisce un angolo di twist  $\alpha_T(z)$  definito come:

$$\alpha_T(z) = \Psi(z) - \Psi(z_{\text{ref}}) \quad (1)$$

In questo modo la parte di flusso al di sotto della quota di riferimento viene deviata da una parte mentre la parte di flusso al di sopra viene deviata dalla parte opposta. In figura 9 sono mostrati due possibili profili dell'angolo di twist, rappresentativi di una andatura upwind e di una downwind.

Si osservi che data la notevole variabilità dei profili  $\alpha_T(z)$  richiesti, il dispositivo deve essere progettato in modo da essere facilmente regolabile. Inoltre, tale dispositivo, deve essere in grado di sviluppare gradienti di  $\alpha_T(z)$  molto più elevati per quote inferiori a  $z_{\text{ref}}$  che non per quote superiori. Infine, poiché per modelli in scala 1:12, quali sono normalmente utilizzati per scafi IACC, la quota  $z_{\text{ref}}$  corrisponde a  $0.8\text{m}$  e la galleria è alta  $4\text{m}$ , la portata di flusso deviata al di sotto della quota di riferimento (ove  $z < z_{\text{ref}}$  e  $\alpha_T < 0$ ) risulta minore di quella al di sopra.

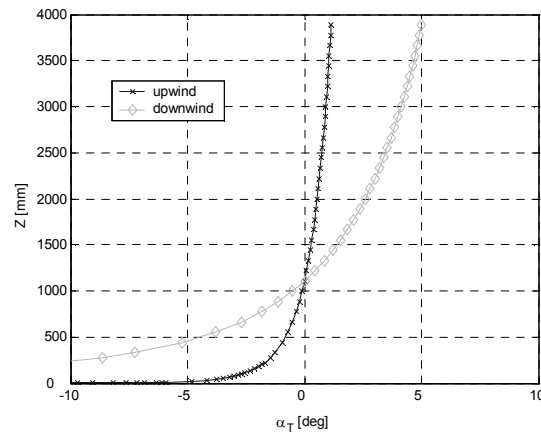


Figura 9. esempio di profili dell'angolo di twist per un'andatura upwind e per una downwind (i valori della quota verticale  $z$  sono in scala modello 1:10)

## 2.1 L'idea innovativa

L'originalità del dispositivo sviluppato dal Politecnico di Milano rispetto alle altre soluzioni è il suo posizionamento al centro della camera di prova senza che, tuttavia, l'intera sezione sia occupata. Infatti, considerando prove su modelli in una configurazione mure a dritta, il ruolo del dispositivo è semplicemente quello di deviare verso sinistra (guardando il vento) la parte bassa del flusso e verso destra la parte alta, mentre la porzione di flusso che non vi passa attraverso permette un globale ribilanciamento della portata del flusso grazie alla sua componente verticale di velocità. Ad evidenza di questo, in Figura 10 si mostra una simulazione numerica 2D di una sezione orizzontale della camera di prova in presenza del dispositivo, ove non è possibile lo svilupparsi della terza componente di velocità e, di conseguenza, il flusso si raddrizza immediatamente dopo essere passato attraverso il dispositivo per poter ribilanciare la portata. La figura presenta le linee di flusso in scala di grigio in base al valore dell'angolo di twist (deg).

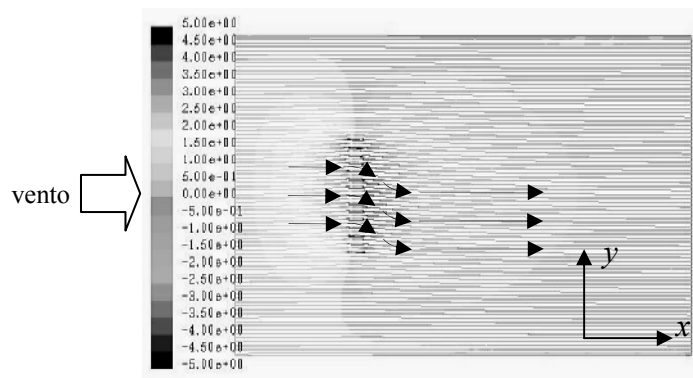


Figura 10. linee di corrente di una simulazione 2D in scala di grigio secondo l'angolo di twist (deg) di una sezione orizzontale della camera di prova. Poiché nella simulazione non è possibile la presenza di una componente verticale della velocità, il flusso deviato dal dispositivo si raddrizza dopo poco per effetto delle pareti.

La simulazione 3D in cui l'intera camera di prova è riprodotta, mostra invece lo svilupparsi di un grande vortice ad asse longitudinale (Figure 11 e 12). La persistenza di questo vortice a valle del dispositivo è legata alla possibilità di instaurarsi una componente di velocità verticale nella parte di flusso che non vi passa attraverso. Si osservi che la sfumatura di grigio delle linee di flusso non varia significativamente lungo l'asse  $x$  e questo mostra il mantenimento dell'angolo  $\alpha_T(z)$  desiderato. Nella simulazione riportata il twist è regolato per una imbarcazione che naviga mure a sinistra e, per convenzione, si è deciso di considerare sempre positivi gli angoli sopra alla quota di riferimento.

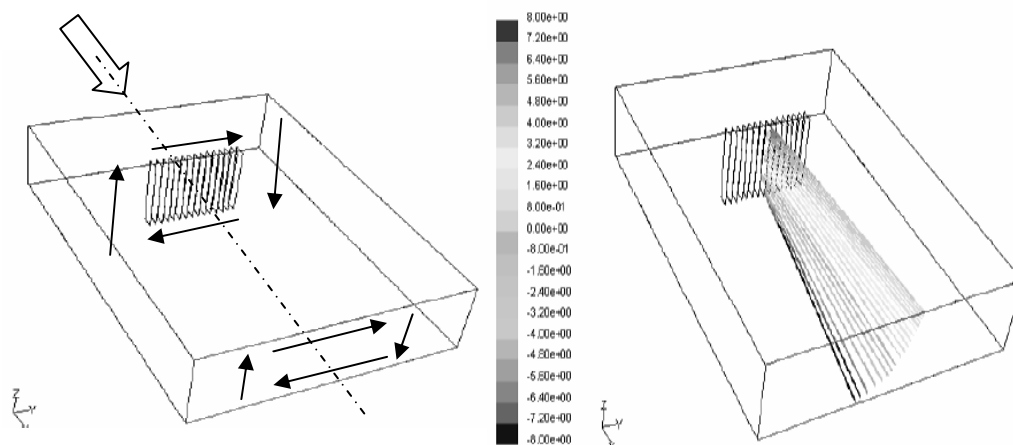


Figure 11 e 12. la simulazione 3D della camera di prova mostra l'instaurarsi di un vortice con asse longitudinale schematizzato a sinistra, il quale consente la permanenza dell'angolo di twist impartito dal dispositivo lungo l'asse della camera come mostrato a destra dalle traiettorie del fluido in sfumature di grigio a seconda dell'angolo di twist (deg).

## 2.2 Progetto e realizzazione del dispositivo

Uno studio preliminare è stato condotto inizialmente nel modello della galleria del vento in scala 1:9 (Zasso *et al.* (2004)). Il modello del dispositivo è stato realizzato mediante 16 lastre caratterizzate da un variazione dell'angolo di twist di  $\pm 10^\circ$ . Il flusso a valle del dispositivo è stato mappato tramite una sonda multiforo e le misure hanno confermato la fattibilità del progetto.

I promettenti risultati hanno portato alla realizzazione del dispositivo in vera grandezza per la galleria del vento del Politecnico di Milano.

Il dispositivo in vera grandezza è stato realizzato con una schiera di 15 lastre in polycarbonato e una corda di 0.7m, spaziate lateralmente di 0.35m. Le lastre si estendono per tutta l'altezza della galleria e sono poste sopravento al tavolo girevole, a circa 8m dal modello di imbarcazione che si prova. La Figura 13 mostra un rendering del dispositivo mentre la Figura 14 mostra il dispositivo installato in camera di prova durante un test su un modello di imbarcazione. Si osservi che mentre lo studio del dispositivo e quindi il rendering in figura è stato progettato per una imbarcazione che navighi mure a sinistra, il dispositivo è ripreso in fotografia in una configurazione per una barca che naviga mure a dritta. Il dispositivo, infatti, può essere indifferentemente regolato per un modello di imbarcazione configurato mure a dritta o a sinistra. Il bordo di ingresso delle lastre è mantenuto parallelo all'asse longitudinale della camera mediante 14 cavi orizzontali. Altri 6 cavi posti in corrispondenza del bordo di uscita regolano la flessione locale della lastra in modo da ottenere l'angolo di twist desiderato. I cavi sono fissati al portale mediante arridatoi che consentono di regolarne la lunghezza (Figura 15). L'estremità superiore di ogni lastra può muoversi all'interno di una guida fissata al soffitto della camera di prova (Figura 16), in modo tale che quando i cavi di controllo sono staccati, tutte le lastre possono essere impacchettate e facilmente rimosse utilizzando una struttura appositamente realizzata (Figura 17).

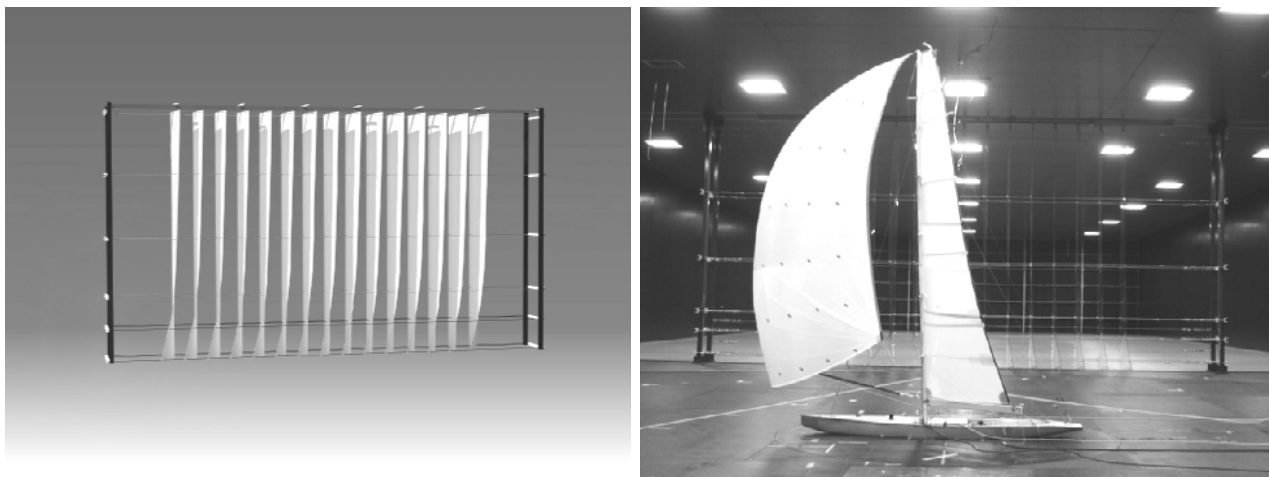


Figure 13 e 14. Rendering del dispositivo e fotografia del dispositivo installato durante una sessione di prova.

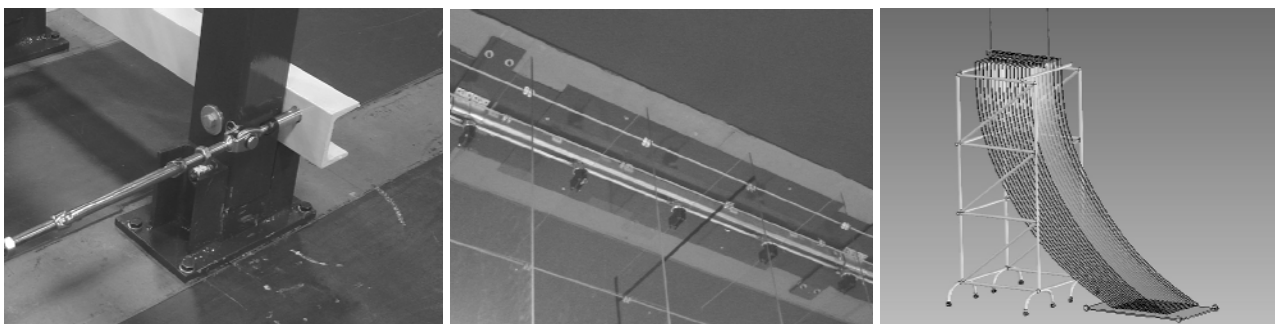


Figure 15, 16 e 17. Dettaglio delle soluzioni tecnologiche adottate, da sinistra: arridatoi per la regolazione dei cavi di controllo, le rotaie su cui sono fissate le lastre a soffitto, la struttura dedicata ad accogliere le lastre quando vengono calate dal soffitto

Gli autori hanno sviluppato una speciale procedura CAD CAE per studiare gli aspetti tecnologici, strutturali e fluidodinamici del progetto (Figura 18). In un foglio elettronico di EXCEL vengono immesse le variazioni di lunghezza impartite ai cavi di controllo. Un modello matematico 3D parametrico del dispositivo implementato in CATIA, si aggiorna automaticamente leggendo i valori dal foglio di EXCEL e genera una griglia strutturale e un file iges. Quest'ultimo viene importato da GAMBIT che attraverso un file di istruzioni parametrico, genera automaticamente una griglia fluidodinamica, la quale viene letta da FLUENT che attraverso un altro file di istruzioni avvia una simulazione CFD. Si confronta il profilo verticale di angolo di twist ottenuto numericamente al centro del tavolo girevole con il profilo atteso e quindi si modificano le variazioni di lunghezza impartite ai cavi di controllo nel file di EXCEL iterando la procedura fin tanto che non si ottiene il profilo di angolo di twist desiderato. Infine, per ogni iterazione, la distribuzione di pressione risultante dall'analisi CFD viene fornita ad ABAQUS insieme alla griglia strutturale generata da CATIA al fine di monitorare le forze sui cavi di controllo e le rilevanti tensioni che si sviluppano sia sulle lastre sia sulle strutture laterali di sostegno.



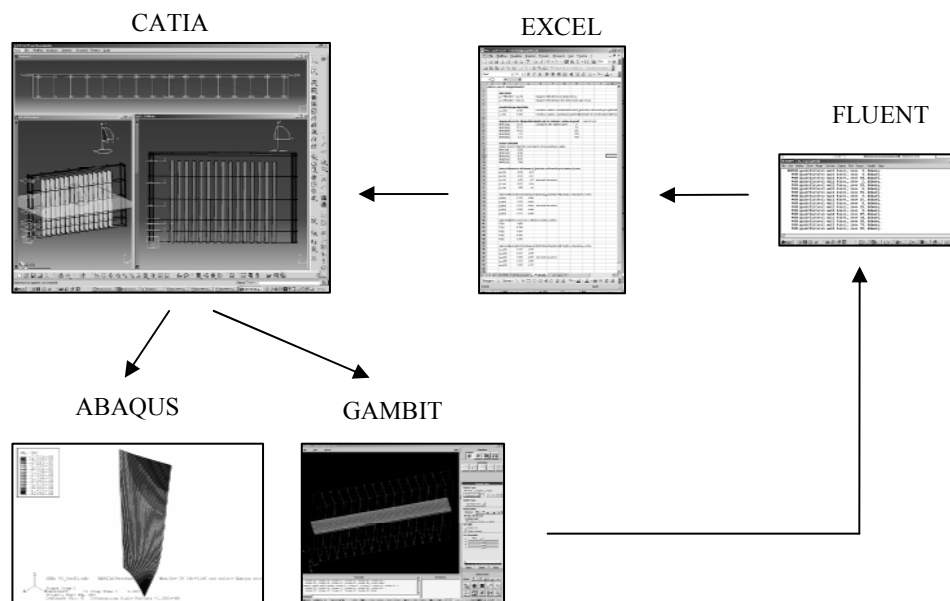


Figura 18. Schema della particolare procedura CAD-CAE implementata dagli autori per l'ottimizzazione del dispositivo.

Prima di procedere alla realizzazione del dispositivo completo, il progetto definitivo è stato validato su un *mokeup* costituito da tre sole lastre alte 2m. In questa fase sono state anche verificate le proprietà meccaniche di diversi materiali viscoelastici al fine di identificarne l'ottimale e verificare i risultati dell'analisi strutturale.

### 3 LA SIMULAZIONE CFD

#### 3.1 analisi bidimensionale

Sebbene la fluidodinamica complessiva non possa essere studiata con un'analisi bidimensionale, tuttavia tale analisi è adatta allo studio della fluidodinamica locale in corrispondenza della singola lastra. In particolare la scelta della dimensione delle corde delle lastre e la loro reciproca distanza, è stata studiata attraverso un'analisi bidimensionale parametrica. Le simulazioni sono state realizzate per le diverse geometrie che le lastre devono poter assumere per realizzare gli angoli di twist di interesse. In figura 19 è mostrato il particolare di una griglia in corrispondenza della singola lastra. La configurazione prescelta ha mostrato assenza di separazione, come si osserva dalla mappa della vorticità  $\omega = \nabla \wedge \mathbf{V}$  (1/s) riportata in figura 20.

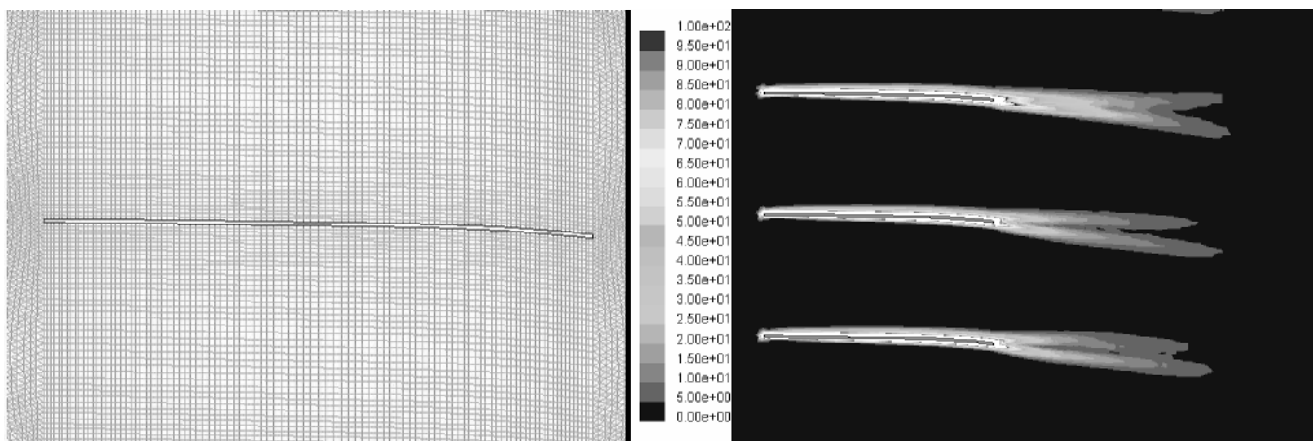


Figure 19 e 20. Particolare della griglia di calcolo bidimensionale intorno al profilo della lastra e distribuzione della vorticità ( $\omega = \nabla \wedge V$ ) in scala di grigi (1/s).

### 3.2 *analisi tridimensionale*

Come detto in precedenza, l'analisi tridimensionale è stata utilizzata al fine di predire la corretta geometria della schiera di lastre che permettesse di ottenere il profilo richiesto in corrispondenza del volume circostante il modello dell'imbarcazione. Differenti configurazioni geometriche sono state studiate per cercare una correlazione tra il profilo dell'angolo del bordo di uscita delle lastre e il profilo dell'angolo di twist in corrispondenza del modello.

La difficoltà della simulazione tridimensionale consiste nella necessità di avere elementi di griglia sufficientemente piccoli in tutto il dominio di calcolo per poter studiare l'evoluzione dell'angolo del vettore velocità in tutta la regione a valle del dispositivo. Volendo indagare la propagazione dell'angolo di twist lungo la camera di prova, infatti, si è posta molta attenzione a minimizzare la diffusione numerica. Per questo motivo è stata scelta una griglia di 2 milioni di elementi esaedrici, i quali hanno sempre due facce il più possibile perpendicolari con la direzione del flusso. Oltre al calcolo di flusso laminare, sono stati utilizzati differenti modelli di turbolenza (*k-ε std*, *k-ε RNG* e *k-ω*, manuale di Fluent V6, (2005)) e trattamenti a parete (*std* e *non equilibrium wall function*, *enhanced wall treatment*, manuale di Fluent V6, (2005)) senza che emergessero differenze significative tra i risultati ottenuti. Le simulazioni sono state realizzate con schema di discretizzazione del secondo ordine per pressione e *momentum*. Come per la simulazione 2D, il problema fisico non necessita di una analisi non stazionaria. La Figura 21 mostra l'evoluzione dell'angolo di twist lungo l'asse longitudinale della galleria in quattro diverse sezioni trasversali con il dispositivo regolato per andature mure a dritta. Si osserva che a sinistra e a destra del dispositivo, l'angolo di twist è molto piccolo. In queste regioni, invece, la portata di flusso è bilanciata da una forte componente di velocità verticale come mostrato in Figura 22 ove è presentata una sezione orizzontale a 2m di altezza dal pavimento. In particolare essendo la sezione al di sopra della quota di riferimento, il flusso viene deviato verso destra, pertanto a sinistra si ha componente di velocità verticale rivolta verso l'alto e a destra verso il basso. Al centro, in corrispondenza del volume intorno al modello, non è presente componente di velocità verticale.

Le figure 23, 24, 25 e 26 mostrano quattro sezioni a differenti quote in cui viene mostrato l'evoluzione dell'angolo di twist. Nella sezione più bassa, disposta a una quota di 0.5m dal pavimento, il flusso è deviato verso sinistra e l'angolo di twist cresce allontanandosi dalle lastre. Nella seconda sezione disposta alla quota di 1m, le lastre sono circa dritte e non si osserva un angolo di twist significativo in tutta la regione a valle del dispositivo. Nella terza e nella quarta sezione disposte rispettivamente a 2m e 3m di altezza, il dispositivo devia il flusso verso destra. L'angolo di twist mostra una trascurabile riduzione allontanandosi dal dispositivo.

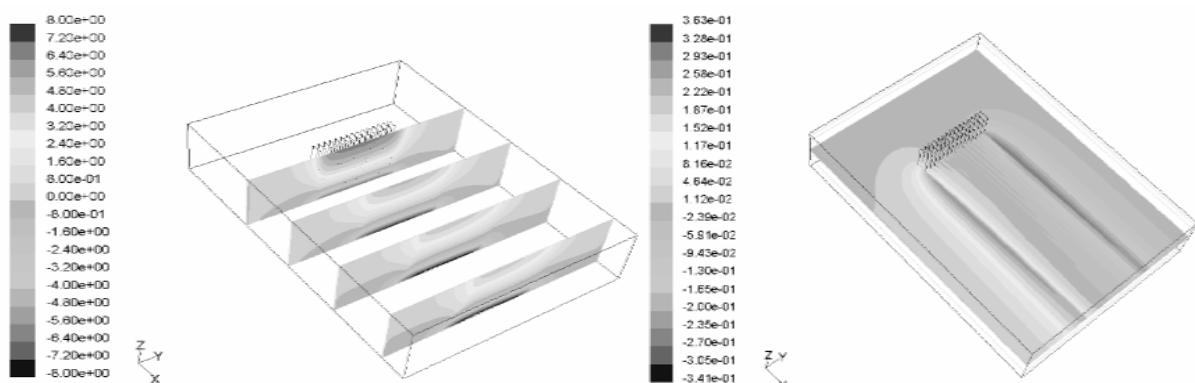


Figure 21 e 22. A sinistra quattro sezioni trasversali della camera di prova mostrano con sfumature di grigi il valore di  $\alpha_T$  (deg); a destra una sezione orizzontale mostra il valore della componente verticale di velocità (m/s)

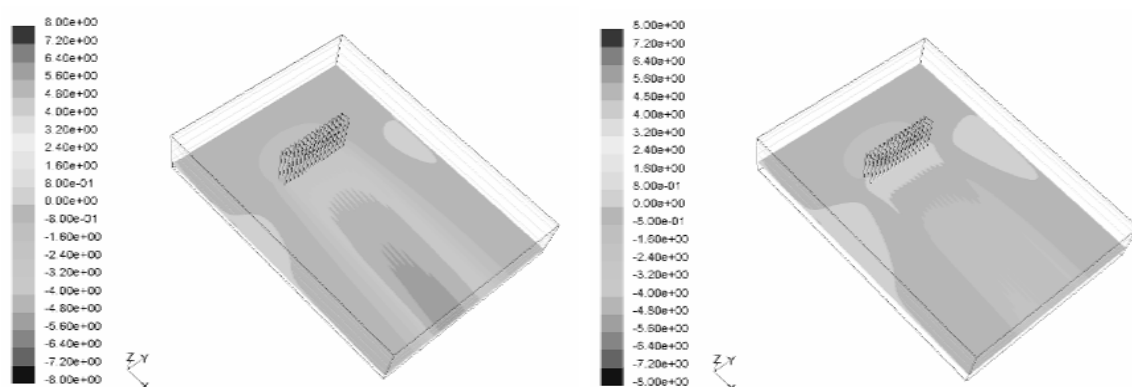


Figure 23 e 24. Distribuzione dell'angolo di twist  $\alpha_T$  (deg) in scala di grigi, rispettivamente su una sezione orizzontale a quota 0.5m e 1m dal pavimento.

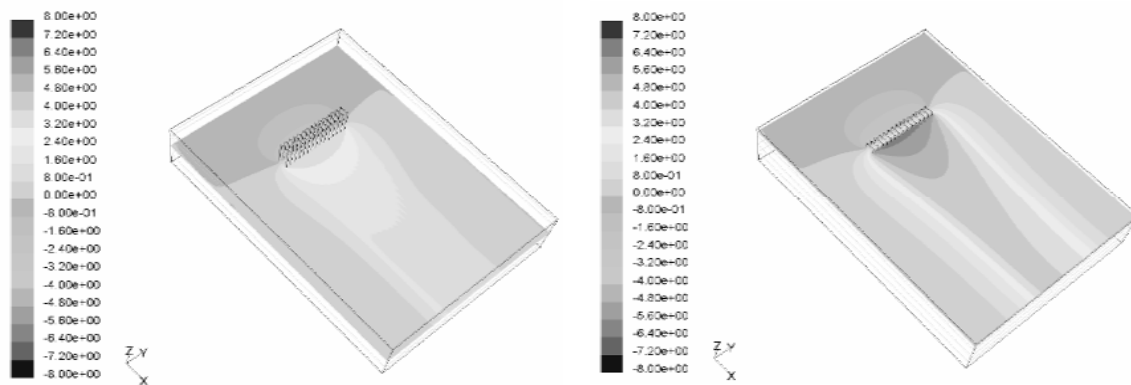


Figure 25 e 26. Distribuzione dell'angolo di twist  $\alpha_T$  (deg) in scala di grigi, rispettivamente su una sezione orizzontale a quota 2m e 3m dal pavimento.

L'incremento dell'angolo di twist nella sezione più bassa e la piccola diminuzione nelle sezioni più alte in funzione di  $x$  sono dovute alla diffusione del gradiente verticale dell'angolo di twist lungo l'asse  $x$ , evidenziato in Figura 27. Infatti, come mostrato in precedenza, il gradiente verticale dell'angolo è molto più grande in corrispondenza del pavimento piuttosto che nella parte alta vicino al soffitto.

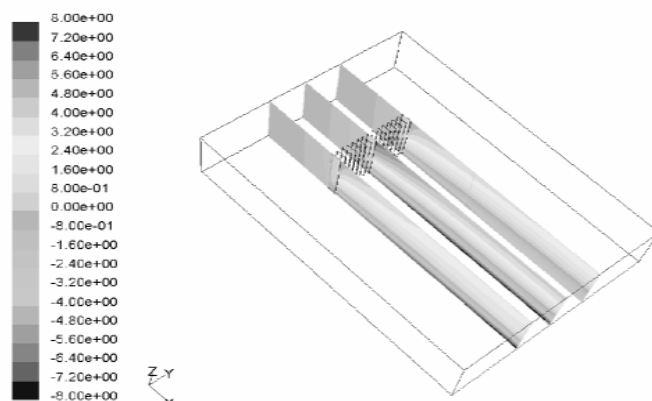


Figura 27. Distribuzione dell'angolo di twist  $\alpha_T$  (deg) in scala di grigi su tre sezioni longitudinali rispettivamente al centro e alle estremità del dispositivo.

#### 4 IL CONFRONTO NUMERICO - SPERIMENTALE

A valle della realizzazione del dispositivo, è stata effettuata una mappatura del flusso in corrispondenza della regione in cui viene collocato il modello. Il dispositivo è stato regolato in modo tale da poter effettuare un confronto tra la predizione numerica e i risultati sperimentali. La mappatura è stata realizzata mediante sonde a filo caldo e multiforo che consentissero di misurare le due componenti di velocità nel piano orizzontale. In Figura 28 è mostrato il confronto tra il profilo di angolo di twist ottenuto mediante simulazione numerica e quello misurato in galleria del vento. Sono mostrati tre profili relativi a tre differenti posizioni trasversali, rispettivamente al centro del tavolo girevole, a +1.340m a destra e -1.350m a sinistra in modo tale da comprendere tutto il volume interessato da un modello in scala 1:10 di imbarcazione. Come già osservato dai risultati numerici, anche sperimentalmente l'angolo di twist non varia significativamente lungo la direzione trasversale. Dal confronto numerico-sperimentale si evince che il dispositivo è in grado di realizzare una deviazione del flusso anche superiore a quella predetta numericamente. In ogni caso le differenze riscontrate tra i risultati numerici e sperimentali possono essere considerate di piccola entità. Bisogna mettere in evidenza che le misure sperimentali hanno mostrato la non dipendenza del profilo di angolo di twist dal valor medio della velocità del flusso incidente, quindi dal numero di Reynolds di galleria, e dal profilo verticale del modulo della velocità. Inoltre, le misure sperimentali hanno mostrato che gli indici di turbolenza non subiscono variazioni significative per effetto della presenza del dispositivo.

In Figura 29 sono riportati tre diversi profili di angolo di twist che sono stati realizzati, rispettivamente per andature di bolina (upwind), al lasco (downwind) e al traverso (running). Le misure sono state realizzate in corrispondenza del centro del tavolo girevole.

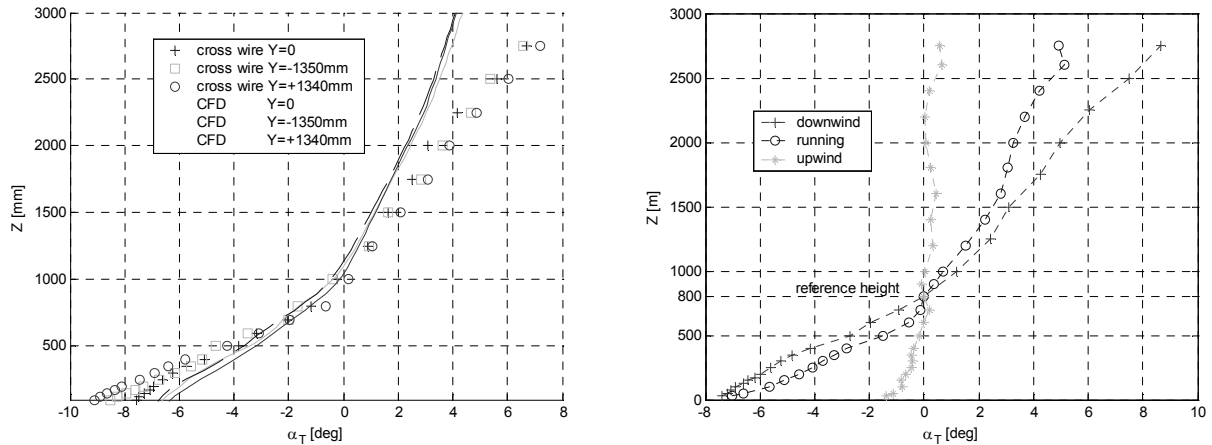


Figure 28 e 29. A sinistra, confronto numerico (linea continua) - sperimentale (per punti) di  $\alpha_T(z)$  al centro del tavolo girevole ( $y=0$ ) e ai lati della sezione occupata dal modello dell'imbarcazione, rispettivamente  $+1.340\text{m}$  a destra e  $-1.350\text{m}$  a sinistra; a destra tre diversi profili di  $\alpha_T(z)$  misurati sperimentalmente rispettivamente per regolazioni del dispositivo per prove in andature di bolina (upwind), al lasco (downwind) e al traverso (running).

## 5 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato il progetto e la realizzazione del nuovo dispositivo per la generazione di twisted flow di cui si è dotata la galleria del vento del Politecnico di Milano, nell'ambito della ricerca che da anni persegue sulla dinamica di imbarcazioni a vela.

Questo dispositivo è composto da una schiera di lastre parallele tra loro e twistate in altezza, poste in una sezione trasversale della camera di prova a sviluppo di strato limite, circa  $8\text{m}$  a monte del centro del tavolo girevole dove viene posto il modello di imbarcazione che viene testato. La sua peculiarità che lo distingue dalle realizzazioni precedenti, consiste nel non occupare tutta la sezione della camera in modo da consentire al flusso che non vi passa attraverso di ripristinare la portata con un moto verticale, innescando un vortice delle dimensioni della camera con asse lungo la direzione del vento, il quale garantisce la permanenza di flusso twistato a valle del dispositivo.

Questo è stato realizzato grazie a una particolare procedura di progetto appositamente implementata che ha consentito una ottimizzazione semi-automatica della geometria delle lastre attraverso l'utilizzo di modellatori 3D, codici strutturali FEM e codici CFD.

Prove sperimentali sul dispositivo realizzato hanno mostrato sostanziale accordo rispetto al comportamento atteso dalle simulazioni CFD e, in particolare, hanno mostrato che il profilo verticale di angolo di twist è mantenuto in una ampia regione attorno alla posizione dove è posto il modello di imbarcazione.

Infine, le soluzioni tecnologiche adottate consentono una veloce regolazione del dispositivo per realizzare il profilo verticale di angolo di twist richiesto, oltre che la completa rimozione o installazione del dispositivo stesso.

## 6 REFERENCES

- J. M. C. Campbell & A. R. Cloughton (1994). Wind Tunnel Testing of Sailing Yacht Rigs.  
*13<sup>th</sup> HISVA symposium* – Amsterdam
- F. Fossati, M. Belloli, A. Zasso (2002). Prove in galleria del vento su modelli di imbarcazioni a vela.  
*XII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento* - Milano
- F. Fossati, G. Diana (2003). L'ottimizzazione delle Prestazioni Attraverso la Ricerca in Galleria del Vento  
seminario *La Ricerca nello Yacht Design* - Milano
- CJ Baker, ND Humphreys (1992). Forces on vehicles in cross winds from moving model tests.  
*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v41-44 -  
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- Bocciolone M., Cheli F., Corradi R., Diana G. Tomasini G (2003). Wind tunnel tests for the identification of  
the aerodynamic forces on rail vehicles. *11th ICWE*, Lubbock, Texas
- R. G. J. Flay, I. J. Vuletic (1995). Development of a wind tunnel test facility for yacht aerodynamic studies  
*Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics*, 58 231-258  
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- R. G. J. Flay, N. J. Locke, G.D. Mallison (1996). Model test of Twisted flow Wind Tunnel designs for testing  
yacht sails. *Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics*, 63 155-169  
Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- R. G. J. Flay (1996). A twisted flow wind tunnel for testing yacht sails. *Journal of Wind Engineering and  
industrial Aerodynamics*, 63 171-182 - Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- Zasso A., Fossati F., Viola I.M., Catena P. (2004). Analisi delle caratteristiche del flusso per prove di  
imbarcazioni a vela in galleria del vento su modelli in scala.  
*XIII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento* - Reggio Calabria
- Fluent 6 User's Guide (2005). Fluent Inc.,